

การจำลองภาพพรมทอมือด้วยเทคนิคคอมพิวเตอร์กราฟฟิก

Hand-Tufted Carpet Simulation by Computer Graphic Techniques

จรัส จีระวิพลวรรณ (Charat Jeeravipoolvarn)* รุจชัย อึ้งอรุณยะวี (Rujchai Ung-arunyawee)**

ดร. วสุ เชาว์พานนท์ (Dr. Wasu Chaopanon)**

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอเทคนิคในการจำลองภาพพรมทอมือโดยบูรณาการเทคนิคต่าง ๆ มาปรับปรุงให้เหมาะกับภาพพรม เทคนิคนี้นำเอาระบบจำลองอนุภาคมาใช้ในการสร้างโครงสร้างควบคุมเส้นพรมบนพื้นผ้าใบ และนำโครงสร้างที่ได้มาสร้างเป็นแนวเส้นใหม่ ต่อมาจึงสร้างภาพตัดขวางของเส้นใหม่ซึ่งเรียกว่า ลูมิสไลซ์ ขึ้นมาและให้ลูมิสไลซ์วิ่งวนไปตามแนวเส้นที่ได้ทั้งหมดพร้อมกับบิดเกรียวตามลักษณะที่ต้องการ ในระหว่างการสร้างลูมิสไลซ์จะมีการกำหนดค่าสีของพรมลงไปตามค่าสีพรมต้นแบบ ในส่วนการตัดแต่งระดับความสูงระบบจะทำการอ่านค่าภาพระดับความสูงเพื่อมาควบคุมการวาดลูมิสไลซ์ว่าควรจะวาดตรงตำแหน่งไหนในแนวเส้นที่สร้างเพื่อให้เป็นไปตามรูปแบบที่กำหนดไว้ และทำให้เกิดภาพพรมจำลองในลักษณะต่าง ๆ ตามต้องการ

ผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถรองรับภาพพรมที่มีสีได้ถึง 16.7 ล้านสี รองรับจำนวนชั้นภาพได้ 24 ชั้น รองรับการปรับระดับความสูงต่ำของบริเวณต่างๆ บนพรมได้สูงสุด 256 ระดับและรองรับจำนวนเส้นใยได้สูงสุดที่ 400x400 เส้นใยในระบบทดสอบ ระบบสามารถจำลองภาพในระดับเวลาจริง (25 เฟรมต่อวินาที) เมื่อความหนาแน่นเส้นใยไม่เกิน 50x50 เส้นใยด้วยเครื่องที่มีหน่วยประมวลผล Celeron ความเร็ว 2.0 GHz และหน่วยความจำ 512 MB ขึ้นไป

ABSTRACT

This research presents a technique to simulate picture of hand-tufted carpet by integrating and modifying many interesting techniques in computer graphics. This research uses particle system to generate dynamic particles moving over the carpet plane. All particle positions are used as a control structure of curve creation. A primitive structure, called Lumislice, is created and transformed along each curve to make yarn twisted. Finally, all color and height of yarn are read from bitmap files which are used as color map and height map for rendering a final image.

The result image can represent 16.7 million colors and contain maximum 24 lumislaces for each line. User can control height of knit by adjusting height map image. This system can work real-time if density of line is lower than 50*50 lines in 2.0 GHz Celeron processor with 512 MB of RAM. This system can generate maximum density of 400*400 lines.

คำสำคัญ : ระบบอนุภาค ภาพระดับความสูง ลูมิสไลซ์

Key Words : Particle system, Height map, Lumislice

* นักศึกษา หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

** อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทนำ

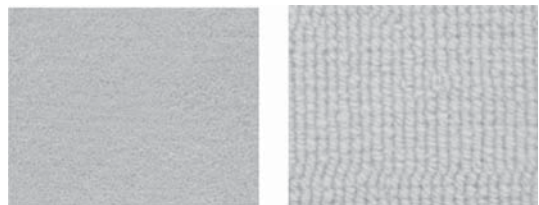
พรมทอมือเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาต้นทุนการผลิตสูงและใช้เวลาในการผลิตนานกว่าพรมที่ทอด้วยเครื่องจักร เมื่อทำการผลิตแล้ว การแก้ไขลวดลายและสีของพรมนั้นทำได้ยากลำบาก ฉะนั้นการจำลองภาพพรมที่มีลักษณะเหมือนจริงด้วยคอมพิวเตอร์จึงเป็นประโยชน์ต่อผู้ผลิตพรมในการลดการสูญเสียต้นทุนการผลิตและเวลา นอกจากนี้ยังสามารถช่วยเพิ่มความพึงพอใจแก่ลูกค้าได้อีกด้วย

การสร้างภาพจำลองของพรมทอมือให้เหมือนจริง ยังไม่มีงานวิจัยใดกล่าวถึง ที่สืบค้นได้จะเป็นการสร้างภาพขนของสัตว์ (Fur) ผมของคน (Hair) และผ้าที่ถักด้วยไหมพรม (Knitwear) ซึ่งในระยะแรกของงานวิจัยทางด้านนี้ การสร้างแบบ (Modeling) และแสดงภาพ (Rendering) จำลองขนและผมจะใช้วิธีการแบบตรงไปตรงมา นั่นคือวิธีการใช้โพลีกอน (Polygon) จำนวนมากมาประกอบกันเป็นเส้นขนหรือผมแต่ละเส้น (Anjyo, Ken-Ichi, Yoshiaki., 1992) (Miller, Gavin., 1988) (Rosenblum Robert, Wayne, 1991) แต่วิธีการแบบนี้จะมีข้อเสียคือเสียเวลาในการประมวลผลมากและเกิดปัญหา aliasing ขึ้นเสมอ ต่อมาวิธีการ Fakefur สามารถแสดงภาพเหมือนจริงของขนสัตว์ที่มีลักษณะสั้น ๆ โดยอาศัยหลักการทางสถิติในการให้แสงแก่ภาพ วิธีการนี้ถูกนำมาเสนอและใช้สำหรับการจำลองภาพขนของเหล่าสุนัขในภาพยนตร์เรื่อง 101 Dalmatians (Dan, 1996) ขณะที่ Graftal textures (Michael, 1999) และ Lapped textures (Lengyel, 2001) ถูกนำมาใช้อย่างได้ผลในการแสดงผลภาพและการเคลื่อนไหวเหมือนจริงแบบ real-time ของทุ่งหญ้า ใบไม้บนต้นหรือขนสัตว์ที่มีลักษณะเป็นเส้นยาว ๆ ตัวอย่างเช่นขนกระต่าย เป็นต้น สำหรับเส้นผมของมนุษย์มีการนำเสนอ Thin Shell Volume (TSV) Model (Tae-Yong, 2000) ขึ้นมาเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการสร้างแบบและแสดงภาพจำลองเหมือนจริงของ

ผมของคนเราในทรงผมมีลักษณะแตกต่างกันได้มากมาย ส่วนการสร้างแบบและการแสดงภาพของผ้าไหมพรมถักเหมือนจริง ได้มีการจำลองหน่วยพื้นฐานของเส้นไหมพรมจริงที่เรียกว่าลุมสไลซ์ (Yanyun Chen et al., 2003) ขึ้นมาเพื่อใช้ในการสร้างภาพผ้าไหมพรมถักที่มีลักษณะเหมือนจริงได้ทั้งที่เป็นภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว

พรมทอมือโดยพื้นฐานทั่วไปแล้วจะถูกแบ่งตามลักษณะวิธีการทอออกได้เป็น 2 แบบหลัก ๆ คือ 1) พรมแบบ Cut ที่เกิดจากการทอที่มีการตัดปลายด้านบนของเส้นไหมพรมที่นำมาทอ (Yarn) เมื่อทอเสร็จทั้งผืนแล้วก็จะมีการตัดแต่งระดับความสูงตามที่กำหนดในแบบด้วยกรรไกรปัตตาเลียน 2) พรมแบบ Loop เกิดจากการทอที่ไม่มีการตัดปลายด้านบนของเส้นไหมพรม แต่จะใช้วิธีม้วนเส้นไหมให้โค้งลงไปเก็บปลายไว้ข้างล่างผืนพรมแทน เมื่อทอเสร็จทั้งผืนจะไม่มีมีการตัดแต่งระดับความสูงด้วยกรรไกร พรมทั้งสองแบบจะมีลักษณะพื้นผิวที่ปรากฏแตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 1

ในงานวิจัยนี้จะเป็นการพัฒนาเทคนิคเพื่อใช้สร้างแบบ จำลองและแสดงภาพจำลองให้เหมือนจริงของพรมทอมือที่เป็นแบบ Cut เท่านั้น โดยสามารถรองรับการใช้สีได้หลายสีในพรมผืนเดียวที่มีการตัดแต่งระดับความสูงที่ต่างกันหลายระดับได้



รูปที่ 1 แสดงลักษณะพื้นผิวของพรมทอมือ แบบ Cut (รูปซ้าย) และแบบ Loop (รูปขวา)

ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การสร้างภาพ 3 มิติ

ในกระบวนการสร้างภาพ 3 มิติ นั้น องค์ประกอบพื้นฐานสุด (Primitives) ที่ใช้ในการทำงานก็คือจุดและเส้น หากทำการเชื่อมต่อจุดหลายๆ จุดด้วยเส้นแล้ว ก็จะสามารถทำให้เกิดเป็นโพลีกอนได้ และการนำโพลีกอนหลายๆ รูปมาประกอบกันก็จะทำให้เกิดรูปทรงต่างๆ ในลักษณะ 3 มิติได้

เมื่อต้องการแสดงรายละเอียดหรือลดละยบบพื้นผิวของรูปทรง 3 มิติที่สร้างขึ้นมาให้ดูเหมือนผิวของวัตถุจริงๆ ก็สามารถทำได้ด้วยการใช้เทคนิคการปะภาพ 2 มิติลงบนผิววัตถุ 3 มิติหรือที่เรียกว่าการทำเทกซ์เจอร์แมป (Texture Mapping) โดยที่ขนาดและตำแหน่งในการวางเทกซ์เจอร์สามารถกำหนดได้ตามความเหมาะสม (Foley, 1990), (Donald, 1996)

2. Bezier Curve

Bezier Curve (Bezier, 1974) เป็นเส้นโค้งที่ได้รับความนิยมใช้งานอย่างกว้างขวางในงานด้านคอมพิวเตอร์กราฟฟิก เนื่องจากมีรูปแบบมาตรฐานที่ง่ายต่อการใช้งานและเหมาะสำหรับการนำไปใช้กับระบบที่ทำงานในลักษณะโต้ตอบกับผู้ใช้

เส้นโค้งชนิดนี้มีลักษณะทั่วไปคือเป็นเส้นโค้งที่เกิดขึ้นจากจุดควบคุม (ความโค้งและความต่อเนื่อง) หลายจุด $P_0, P_1, \dots$ และ P_n ซึ่งเราเรียกเส้นโค้งนี้ว่า มีอันดับเท่ากับ n และเราสามารถหาตำแหน่งจุดใดๆ $P(t)$ บนเส้นโค้งนี้ได้จากสมการ

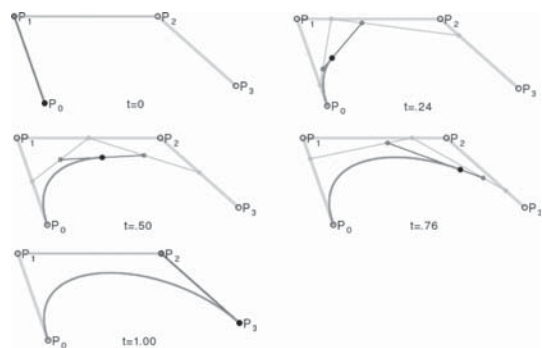
$$P(t) = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} t^i P_i \quad (1)$$

$$\text{เมื่อ } 0 \leq t \leq 1 \text{ และ } \binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$$

กรณีพิเศษคือ กรณีที่ 1) เมื่อ $n = 2$ เส้นโค้งจะมีจุด

ควบคุม 3 จุดและจะเรียกว่าเป็น Quadratic Bezier curve กรณีที่ 2) เมื่อ $n = 3$ เส้นโค้งจะมีจุดควบคุม 4 จุด และจะเรียกว่าเป็น Cubic Bezier curve

วิธีการวาดเส้นโค้งชนิดนี้อยู่บนแนวคิดการทำ Subdivision ซึ่งขอยกตัวอย่างเส้นโค้งเส้นหนึ่งี่ควบคุมด้วยจุด 4 จุดดังแสดงในรูปที่ 2 ในขั้นแรกจะทำการลากเส้นตรงเชื่อมต่อระหว่างจุดทั้งหมดซึ่งในตัวอย่างนี้จะได้เส้นตรง 3 เส้น ทำการหาตำแหน่งของจุดบนเส้นทั้งสามที่ค่า t เท่ากับ 0.0 แล้วสร้างเส้นตรงขึ้นมาใหม่โดยการเชื่อมต่อจุดบนเส้นที่หาได้ซึ่งตอนนี้จะเหลือเป็น 2 เส้น ทำการหาตำแหน่งของจุดบนเส้นใหม่ทั้งสองที่ $t = 0.0$ แล้วลากเส้นตรงเชื่อมต่อจุดที่หาได้ซึ่งจะเหลือเส้นตรงเพียงเส้นเดียว หากทำการหาตำแหน่งของจุดบนเส้นตรงใหม่นี้ที่ $t = 0.0$ ก็จะได้ว่าจุดๆนั้นเป็นจุดบนเส้นโค้งที่ $t = 0.0$ จากนั้นเพิ่มค่า t แล้วทำ Subdivision ซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่ง $t = 1.0$ ก็จะได้เส้นโค้ง Bezier ที่เป็นไปตามสมการที่ (1)



รูปที่ 2 แสดงวิธีการวาด Cubic Bezier curve จุดดำที่บ่งชี้หมายถึงตำแหน่งบนเส้นโค้งเมื่อ t มีค่าเป็น 0.00, 0.24, 0.50, 0.76 และ 1.00

3. ระบบอนุภาค (Particle system)

ระบบอนุภาคเป็นวิธีการสำหรับสร้างแบบและแสดงภาพวัตถุหรือสิ่งต่างๆ ที่มีรูปลักษณ์ไม่แน่นอนเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา (Reeves, 1983)

ตัวอย่างเช่น เปลาไฟ ก้อนเมฆ กลุ่มควัน เป็นต้น รวมไปถึงเทคนิคในการทำภาพเคลื่อนไหวแสดงการเปลี่ยนแปลงรูปทรงที่เกิดขึ้นตลอดเวลาซึ่งไม่สามารถดำเนินการได้โดยวิธีการอื่นๆที่เคยใช้มาก่อน

การสร้างแบบและแสดงภาพของระบบอนุภาคมีข้อแตกต่างจากวิธีการอื่นๆทั่วไปอยู่ 3 ข้อ ได้แก่ 1) ขอบเขตและรูปทรงของวัตถุเกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นกลุ่มของอนุภาคพื้นฐาน ไม่ได้เกิดจากการประกอบกันของพื้นผิวเล็กๆเหมือนเช่นในวิธีการอื่นๆ 2) ระบบอนุภาคเป็นระบบที่ไม่คงที่มีการเปลี่ยนแปลงและเคลื่อนที่ตลอดเวลา มีการเกิดอนุภาคใหม่และมีการตายของอนุภาคเก่า 3) ขบวนการสโตแคสติก (Stochastic processes) ถูกนำมาใช้ทั้งในการสร้างระบบและการเปลี่ยนแปลงรูปทรงของระบบ

อนุภาคในระบบจะมีคุณสมบัติประจำตัว เช่น ตำแหน่ง ขนาด รูปทรง ความเร็ว (ทั้งขนาดและทิศทาง) อายุ สี และอายุ เป็นต้น จำนวนคุณสมบัติของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับระบบที่ถูกจำลอง การแสดงภาพอนุภาคเหล่านี้จะแสดงด้วยองค์ประกอบทางกราฟฟิกพื้นฐาน เช่น จุดและเส้น หรืออาจจะแสดงด้วยรูปทรงที่ซับซ้อนก็ได้

วงจรชีวิตของอนุภาคในระบบแบ่งออกเป็น 3 ระยะคือ

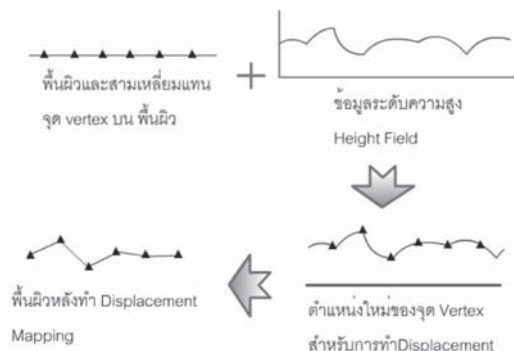
1. ระยะ Generation เป็นระยะการกำเนิดอนุภาคใหม่ให้แก่ระบบว่าจะมีจำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นใหม่มากน้อยเพียงใด และอนุภาคแต่ละตัวมีคุณสมบัติเริ่มต้นเป็นเช่นใด

2. ระยะ Dynamic เป็นระยะที่มีปรับสถานภาพของอนุภาคไปตาม Parameter ต่างๆที่ระบุเอาไว้

3. ระยะ Extinction เป็นระยะที่อนุภาคจะตายและหายไปจากระบบอันเนื่องมาจากการถึงอายุขัยหรือคุณสมบัติบางอย่างมีค่านอกเหนือขอบเขตที่กำหนดไว้

4. Displacement Mapping

การทำให้วัตถุมีลักษณะพื้นผิวตามภาพระดับที่ต้องการ เป็นกระบวนการอ่านค่าสีจากภาพระดับ (height map) แล้วทำการปรับเพิ่มจำนวน Vertex แล้วจึงปรับตำแหน่งของ Vertex ตามทิศทางของ Normal Vector ให้มีความสูงต่ำตามระดับความเข้มของสี ซึ่งจะส่งผลให้เกิดลักษณะพื้นผิวของวัตถุจริงๆ วิธีการนี้ได้ขยายขีดความสามารถของการทำ Texture Mapping ให้สูงขึ้น มีความสมจริงเพราะมีปรับตัวโมเดล 3 มิติในระดับ Vertex ซึ่งส่งผลให้ภาพที่ได้มีความละเอียดสูง แต่การประมวลผลก็จะช้าลง (Foley, 1990), (Donald, 1996) วิธีการนี้ได้มีการนำไปใช้กับการสร้างภาพพรมในงานออกแบบภายในอีกด้วย และการ์ดจอปัจจุบันก็รองรับการทำงานแล้ว

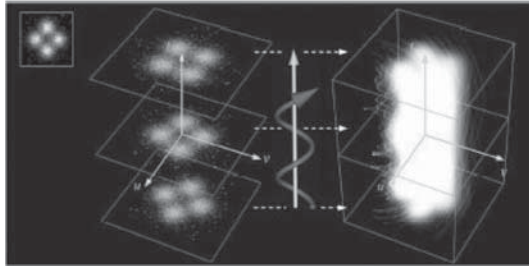


รูปที่ 3 การทำ displacement mapping

5. Lumislice

Yanyun Chen และคณะได้ทำการวิจัยเพื่อสร้างโมเดลในการจำลองภาพไหมพรมถักซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอเทคนิคการแสดงผลโดยอาศัยลูมิสไลซ์ (Lumislice Base Rendering) ซึ่งเทคนิคนี้ทำการสร้างภาพไหมพรมถักจากภาพตัดขวาง 2 มิติพื้นฐานที่เรียกว่า ลูมิสไลซ์ (Lumislice) ที่วิ่งวนไปบนโครงสร้างของเส้นไหมพรมถัก ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4 โดยที่โครงสร้างของเส้นไหมพรมถักจะถูกกำหนดตามแบบของการถักไหมพรมอีกทั้ง

เทคนิคนี้ยังสามารถสร้างภาพที่มีรายละเอียดได้ทั้งในระดับใกล้และไกลด้วย (Yanyun Chen, Stephen Lin, Hua Zhong, 2003)



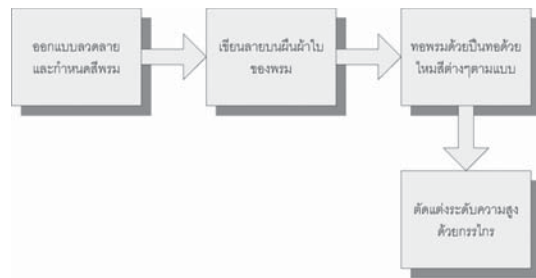
รูปที่ 4 แสดงเทคนิคการแสดงผลโดยอาศัยลูนีสไลซ์ ภาพบนซ้ายเป็นภาพตัดขวางของเส้นใย และภาพกลางแสดงการวิ่งวนของลูนีสไลซ์ตามแนวเส้นไหมพรมถัก และภาพขวาเป็นภาพผลลัพธ์ของเส้นไหมพรมถักในรูปทรงสามมิติ

วิธีดำเนินการวิจัย

ในการจะสร้างแบบจำลองนี้เราได้ทำการศึกษาการทอพรมและเทคนิคในการสร้างภาพแล้วนำเทคนิคต่างๆ มาปรับปรุงให้เกิดระบบดังนี้

1. การศึกษาเก็บข้อมูลที่โรงงานผลิตพรม

ในงานวิจัยนี้เราได้เข้าไปเก็บข้อมูลในการผลิตพรม ณ โรงงานพรมทอมือแห่งหนึ่งในจังหวัดขอนแก่น พบว่าในกระบวนการผลิตพรมนั้นจะมีขั้นตอนตามแสดงในรูปที่ 5 โดยเริ่มจากการออกแบบลวดลายและกำหนดสีของพรม แล้วจึงจะนำภาพแบบที่ได้ไปวาดลงบนผืนผ้าใบที่ถูกขึงให้ตึง จากนั้นก็ทำการทอพรมด้วยปิ่นยี่งไหมสีต่างๆ ตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้ หลังจากทอเสร็จสิ้นทั้งผืนแล้วจึงนำพรมที่ได้ไปตัดแต่งระดับความสูงของลวดลายตามแบบอีกครั้งหนึ่ง แล้วจึงทำการบรรจุส่งให้แก่ลูกค้า

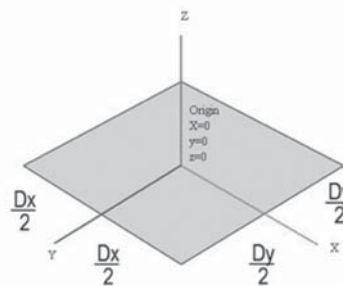


รูปที่ 5 แสดงแผนผังแสดงกระบวนการจริงๆ ของการผลิตพรมทอมือในโรงงาน

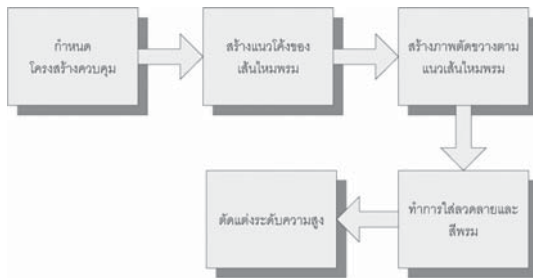
2. แนวความคิดของระบบจำลองภาพพรม

ในการสร้างภาพนี้เราได้กำหนดให้มีการสร้างระนาบเริ่มต้นสำหรับการสร้างภาพ ซึ่งในแบบจำลองนี้เราให้ระนาบดังกล่าวถูกสร้างขึ้นที่จุดเริ่มต้น $(0, 0, 0)$ ของพิกัดในโลก 3 มิติโดยมีขนาดเป็นสี่เหลี่ยมที่สมมาตรทั้งแกน x และ y โดยมีรูปแบบดังภาพที่ 6

เมื่อได้ระนาบเริ่มต้นที่แทนผืนผ้าใบของพรมจริงแล้ว ก็จะดำเนินการตามขั้นตอนที่แสดงในรูปที่ 7 โดยจะทำการกำหนดโครงสร้างหลักสำหรับควบคุมลักษณะแนวโค้งของเส้นไหมพรมแต่ละเส้นบนพรม จากนั้นนำค่าของโครงสร้างควบคุมที่ได้ไปสร้างแนวเส้นไหมพรมทั้งหมด แล้วจึงทำการสร้างภาพตัดขวางของเส้นไหมพรมที่ใช้ทอตามแนวของเส้นไหมพรม ต่อจากนั้นก็ทำการใส่ลวดลายและสี และขั้นตอนสุดท้ายก็จะเป็นการตัดแต่งระดับความสูงพรมตามที่แบบกำหนด



รูปที่ 6 แสดงระนาบขอบเขตเริ่มต้นของพรมจำลองที่มีขนาดในแนวแกน x และ y เท่ากับ Dx และ Dy ตามลำดับ



รูปที่ 7 แสดงแผนผังแสดงกระบวนการจำลองพรมทอมือในงานวิจัยนี้

3. การกำหนดโครงสร้างควบคุม

โครงสร้างควบคุมหมายถึงกลุ่มข้อมูลที่ถูกนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งและแนวโค้งของเส้นไหมแต่ละเส้นบนผืนพรม ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบอนุภาคกำหนดโครงสร้างควบคุมเนื่องจากมีความยืดหยุ่นสูงสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมของลักษณะงาน และในงานวิจัยนี้ได้ปรับรูปแบบของระบบอนุภาคให้มีการทำงานดังนี้คือ กำหนดให้ Emitter หมายถึงระนาบที่จะใช้สร้างอนุภาคและให้อายุของอนุภาคที่เกิดขึ้นมามีได้เพียง 4 ค่าเท่านั้น ซึ่งมีผลทำให้เกิดจุดควบคุม 4 จุดตามแนวความสูงของเส้นไหมแต่ละเส้นไหมจะมีตำแหน่งของการวางตัวอยู่ภายในขอบเขตพื้นที่เล็กที่สุดที่เส้นใยสามารถเคลื่อนที่ได้ เรียกว่า Particle Boundary และในแต่ละระดับความสูงของเส้นใยอนุภาคที่สร้างขึ้นมาจะมีอายุของตัวเองซึ่งจะมี 4 ค่าคือ 1 ถึง 4 โดยค่าที่ได้จะใช้ในการประมาณค่าสีในแต่ละระดับความสูงของเส้นใยต่อไปในขั้นตอนการแสดงผล

วิธีการสร้างอนุภาคทำได้โดยการกำหนด Translation Matrix T ที่มีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาในลักษณะแบบสโตแคสติก ที่มีค่าความยุ่งเหยิง (Variation) คงที่ นั่นคือกำหนดให้

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

เมื่อ

$$Tx = \text{variation} * \text{random}_{t=t1} * \text{size of boundary}/2$$

$$Ty = \text{variation} * \text{random}_{t=t2} * \text{size of boundary}/2$$

ซึ่งถ้ากำหนดให้ $P_0 = [[X_0 \ Y_0 \ 1]^T$ เป็นตำแหน่งในระบบพิกัดแบบโฮโมจีเนียสของอนุภาค ศูนย์กลางของขอบเขตที่อนุญาตให้มีอนุภาคเกิดได้ (Particle Boundary) แล้วจะได้ว่าตำแหน่งของอนุภาคที่สร้างเป็นดังนี้

$$P = T * P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ส่วนอายุของอนุภาคในระบบนี้ จะถูกกำหนดให้มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยค่าคงที่ ซึ่งสามารถแสดงได้ตามสมการ (4) ข้างล่าง

$$Age = Age + \frac{\max_age}{\max_cp} \quad (4)$$

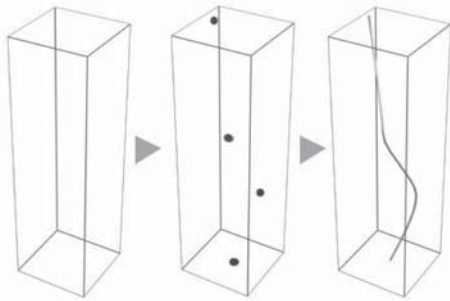
เมื่อ

$\max_age$ คือ ค่าคงที่อายุสูงสุดที่เป็นไปได้ของอนุภาค

$\max_cp$ คือ ค่าคงที่จำนวนของจุดควบคุม

4. การจำลองแนวเส้นไหมพรม

หลังจากที่ได้โครงสร้างควบคุมแล้วต่อมาคือการสร้างแนวเส้นไหมโดยสร้างเป็นเส้นโค้งที่ใช้ข้อมูลจุดจากควบคุม 4 จุดด้วยทฤษฎี Bezier Curve ที่ได้กล่าวไปก่อนแล้ว จุดทั้ง 4 ที่ได้มาจากโครงสร้างควบคุมนั้นเป็นจุดควบคุมความโค้งของเส้น เพื่อให้ได้เส้นโค้งที่อยู่ใน Particle Boundary ดังรูปที่ 9 ไปเรื่อยๆ จนครบทุกเส้นในโครงสร้างควบคุมตำแหน่งต่างๆ ที่อยู่บนเส้นโค้งที่ได้ในขั้นตอนนี้จะถูกใช้เป็นข้อมูลในการกำหนดตำแหน่งการวาดระนาบลูมิสไลซ์ ต่อไป



รูปที่ 8 แสดงรูปแบบการจำลอง Particle บน Emitter และแนวเส้นไหมพรมหนึ่งเส้น

5. การสร้างเส้นไหมพรมของพรมที่ทอ

ในกระบวนการให้รายละเอียดกับเส้นใยให้แตกต่างจากงานที่จำลองเส้นขนหรือผม แนวความคิดในการพัฒนาจะเป็นลักษณะเดียวกับลูมิสไลซ์ คือให้เส้นใยเหล่านี้เกิดจากการรวมกันของเส้นไหมเล็กๆ แล้วบิดเกลียว ดังนั้นเราจึงสร้าง ภาพตัดขวางของเส้นใยในลักษณะของการหมุนบิดเกลียวของเส้นใยเพื่อให้รายละเอียดของภาพเหมือนจริง

ขั้นตอนการสร้างภาพตัดขวางจะใช้วิธีการดังนี้

1. สร้างรูปแบบภาพตัดขวางของเส้นไหม 1 เส้น (หน่วยที่เล็กที่สุดในการแสดงผล)
2. ทำการวาดภาพตัดขวางของเส้นไหมพรม (ภาพที่รวมเส้นไหมเข้าเป็นปมที่จะใช้ทอ)
3. ทำการบิดเกลียวเส้นไหมพรมตามลำดับความสูง

ในกระบวนการนี้ เราพัฒนาให้ระบบมีลักษณะที่ยืดหยุ่นโดยทั้ง 3 ขั้นตอนนั้นสามารถปรับเปลี่ยนหรือปิดการใช้งานบางหัวข้อตามลักษณะของปมไหมได้ ในกรณีที่ปมไหมบางลักษณะที่เป็นทรงกระบอกหนาและไม่มีการบิดเกลียวก็สามารถปรับใช้งานได้ และถ้าปมไหมมีความซับซ้อนก็สามารถที่จะทำงานได้ ซึ่งไม่ส่งผลต่อโครงสร้างการทอหรือระดับความสูงรวมทั้งสีของพรมด้วย

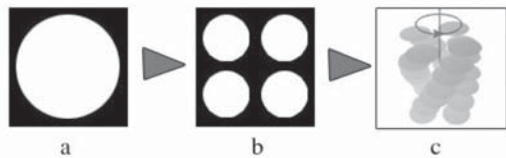
ขั้นตอนที่ 1 การสร้างภาพตัดขวางเส้นไหม สามารถเป็นลักษณะภาพ 2 มิติแสดงภาพตัดขวางใดๆ ก็ได้ตามต้องการโดยจะต้องให้มีสีเริ่มต้นเป็นสีขาวเป็นส่วนที่จะแสดงผล และส่วนที่เป็นการให้ค่าโปร่งใส ซึ่งในกรณีการทดสอบเราใช้รูปวงกลมแทนเส้นไหม

ในขั้นตอนที่ 2 ระบบจะวาดภาพตัดขวางของเส้นไหมลงในลูมิสไลซ์ ตามแนวการวางตัวของเส้นไหมในปมไหมในลักษณะต่างๆ โดยการ Translation ภาพเส้นไหมที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ไปบนตำแหน่งต่างๆ ในระนาบลูมิสไลซ์ หากว่าปมไหมเป็นแบบปมใหญ่ปมเดียวก็จะทำการวาดเพียงปมเดียวบนจุดศูนย์กลางของลูมิสไลซ์ ในขั้นตอนนี้

ในขั้นตอนที่ 3 ระบบจะนำลูมิสไลซ์มาหมุน (บิดเกลียว) โดยมีจุดศูนย์กลางการหมุนเป็นจุดกึ่งกลางของลูมิสไลซ์ แล้วจึงนำภาพที่ได้ไปประกอบกับโครงสร้างเส้น Bezier ซึ่งสามารถเลือกที่จะหมุนหรือไม่ก็ได้เช่นเดียวกัน ในกระบวนการนี้เราใช้รูปแบบของการทำงาน Matrix Stack ที่มีใน OpenGL ซึ่งเป็นหลักการในการสร้างภาพที่มีความซับซ้อนจากรูปทรงอย่างง่ายหลายๆ ชิ้น ทำให้สามารถใช้รูปแบบในการวาดภาพตัดขวางปมไหมอันเดียวกับปมไหมที่ต้องการทั้งหมดได้

ขั้นตอนนี้เราให้ภาพตัดขวางของเส้นใยเป็นสีขาวเพื่อให้สามารถนำไปให้สีต่างๆ ตามค่าที่ได้อ่านเข้ามาในภายหลัง

ในกระบวนการนี้เราได้เพิ่มแนวคิดการทำเส้นพรมต้นแบบ เรียกว่า Lumislice index ซึ่งเป็นวิธีการนำเอาลูมิสไลซ์ ที่ได้ทำการหมุนแล้วมาเก็บในอะเรย์ เพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ในรูปของการอ้างอิงข้อมูลเพื่อลดการประมวลผล เมื่อต้องการสร้างภาพเส้นใยเราจึงทำเพียงแค่ตรวจสอบว่ามีการหมุนบิดเกลียวหรือไม่ถ้ามีระบบจะไปดึงข้อมูลภาพการบิดเกลียวที่อยู่ในอะเรย์ในลำดับนั้นๆ มาจนกว่าจะครบทั้งเส้นใย ซึ่งการทำในลักษณะนี้จะมีการใช้ หน่วยความจำเพิ่มขึ้นตามจำนวนภาพการบิดเกลียวที่ใช้



รูปที่ 9 แสดงขั้นตอนสร้างภาพเส้นไหมที่ทอ โดยที่
(a) แสดงภาพตัดขวางของ 1 เส้นใย (b)
แสดงการเรียงตัวของ 4 เส้นใยในไหมพรม
ที่ทอ 1 เส้น (c) แสดงการบิดเกลียวของ
เส้นไหมพรมที่ใช้ทอ

6. การใส่ลดทอนและสีพรม

เมื่อได้โครงสร้างทั้งหมดแล้วก็นำภาพบีตแมปมาตรฐาน 24 bit มาใช้เป็นรูปต้นแบบในการย่อมหตุผลที่เลือกภาพในลักษณะนี้เพราะว่าภาพในลักษณะนี้เป็นภาพทั่วไปที่สามารถสร้างขึ้นมาใช้งานได้และมีรูปแบบการเก็บข้อมูลที่สามารถทำความเข้าใจได้ วิธีการคืออ่านค่าสีจากภาพบีตแมปเอามาเก็บในหน่วยความจำแล้วจึงทำการอ่านข้อมูลที่ได้ตามตำแหน่งของการวาดเส้นใยซึ่งมีวิธีการดังนี้

1. อ่านข้อมูลภาพมาเก็บในหน่วยความจำภาพบีตแมปนั้นจะทำการเก็บข้อมูลในลักษณะของสี 3 สี นั่นคือ แดง เขียว น้ำเงิน ซึ่งจะเก็บค่าเรียงกัน 3 Byte ในแต่ละ Pixel

2. สร้างตัวแปรแบบอะเรย์ 2 มิติสำหรับแกน X และ Y แทนจำนวนเส้นใยของพรมทั้งหมดและวนรอบเปรียบเทียบตำแหน่งเส้นต่างๆ ของเส้นใยในโครงสร้างกับตำแหน่งของจุดในภาพต้นแบบภาพโครงสร้างข้อมูลที่ใช้ในการเก็บประกอบด้วยตัวแปร 3 ตัวสำหรับค่าสี วิธีดึงค่าจากตารางสีเป็นดังนี้

```
for ( j=0;j<mx ;j++)
{
    for (int i=0;i<my;i++)
    {
        p= floor(j*bmp.width/mx);
```

```
q= floor(i*bmp.height/my);
cc[i,j].red = bmp.pixel[p,q].red/255;
cc[i,j].green = bmp.pixel[p,q].green/255;
cc[i,j].blue = bmp.pixel[p,q].blue/255;
    }
```

}
โดยที่

p, q คือ ตำแหน่งของสีที่ต้องการจะดึงออกมา

mx, my คือ จำนวนปมไหมทั้งหมดตามแนวแกน X และ Y

cc[i, j] คือ ตำแหน่งของปมไหมที่จะให้สี โดยค่า r, g, b คือตัวแปรรับค่าสี 3 สี

3. หลังจากย่อสีให้กับภาพแล้ว จะคูณค่าระดับความมืด เพื่อให้เกิดการไล่ระดับสีในแต่ละชั้นของพรมทำให้เกิดความลึกของภาพจากสีของชั้น

ในการคำนวณหาค่าระดับความสว่างของสีในแต่ละชั้นนั้นทำดังนี้

```
newcolor = ocolor*(sx/step);
```

เมื่อ newcolor คือ ค่าสีที่ใหม่

sx คือ หมายเลขของระดับของชั้นลุ่มสีไล่ดซ์

step คือ จำนวนชั้นที่จะวาดลุ่มสีไล่ดซ์

ocolor คือ ค่าของสีต้นแบบที่ได้อ่านค่ามาจากเส้นใย

7. การปรับระดับความสูงบนพรม

ในกระบวนการทอพรมทอมือจะมีขั้นตอนการตัดแต่งระดับความสูงซึ่งเป็นขั้นตอนของการให้ความสูงต่ำบริเวณลดทอนต่างๆ ซึ่งสามารถนำแนวคิดในเทคนิคการสร้างภาพแบบ Displacement mapping มาปรับใช้โดยการอ่านค่าระดับจากไฟล์ข้อมูล queเก็บค่าระดับของพรมโดยข้อมูล queอ่านมาจะมีลักษณะเป็นภาพระดับเทา 2 มิติ ซึ่งจะมีค่าสี

ในแต่ละจุดตั้งแต่ 0 ถึง 255 ระดับ ซึ่งนำไปใช้ในการจำกัดความสูงของการวาดลুমิลไสซ์ของแต่ละเส้นใยที่ต้องการตัดแต่งระดับโดยใช้สมการในการหาระดับความสูงของเส้นใยเป็น

$$CHHeight(x, y) = \frac{Rh_f * \max Height}{\max H_f} \quad (5)$$

เมื่อ

CHHeight คือ ค่าความสูงที่ต้องการหาของเส้นใย

Rh_f คือ ค่าที่อ่านได้จากค่าระดับความสูง

maxHeight คือ ค่าสูงสุดของความสูงที่จะทอด

maxH_f คือ ค่าสูงสุดที่เป็นไปได้ของค่าภาพระดับ

ทำการวนรอบทุก ๆ ตำแหน่งในเส้นใยเพื่อที่จะกำหนดจุดในการวาดระนาบลูมิสไสซ์ โดยค่าความสูงที่อ่านมาได้จากรูปนั้นจะถูกนำมาเป็นตัวหารของตัวแปรที่จะบวกค่าตำแหน่งของระดับความสูงของการวาดระนาบดังสมการ

$$NewPos = OldPos / (1 + (1/Height_Level))$$

เมื่อ

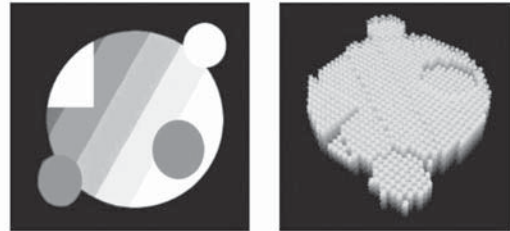
NewPos คือ ตำแหน่งความสูงในแต่ละระดับของระนาบที่จะวาด

OldPos คือ ตำแหน่งความสูงในแต่ละระดับเดิม

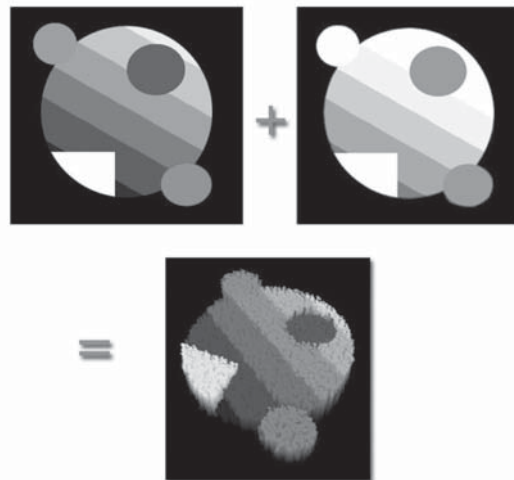
High_level คือ ค่าระดับความสูงที่อ่านเข้ามา

เมื่อได้ผ่านค่าเข้าสมการแล้วจะได้ค่าระดับใหม่โดยค่าระดับที่อ่านมาหากมีค่ามากจะทำให้ระดับมีการเปลี่ยนแปลงน้อยในขณะที่หากอ่านมามีค่าน้อยจะทำให้ค่าใหม่ที่ได้มีค่าแตกต่างจากเดิมในทุกๆ ระดับความสูงส่งผลให้ภาพที่ได้มีความลึกตามต้องการ กระบวนการนี้จะทำไปทุก ๆ เส้นใยที่จะทำการวาด โดยในการพัฒนาเราได้ทำการเพิ่มเงื่อนไขว่า หากพบจุดสีดำสนิท (RGB = 0) ระบบจะไม่ทำการ

วาดเส้นใยใดๆ เพื่อให้สามารถสร้างพรมที่มีรูปแบบอิสระได้มากขึ้น



รูปที่ 10 แสดงผลของการตัดแต่งระดับความสูงที่เป็นภาพระดับสีเทา โดยที่ภาพซ้ายเป็นภาพระดับ ส่วนภาพขวาเป็นภาพผลลัพธ์ที่ได้จากการตัดแต่งระดับความสูงตามภาพซ้ายมือ



รูปที่ 11 แสดงผลของการตัดแต่งระดับความสูงที่เป็นภาพสี โดยที่ภาพบนซ้ายเป็นภาพต้นแบบสีพรม บนขวาเป็นภาพระดับที่ใช้ในการทดลอง ส่วนภาพล่างเป็นภาพผลการทำงานของโปรแกรม

8. การทดสอบพรม

การทดสอบระบบการจำลองภาพพรมมีดังต่อไปนี้

8.1 การทดสอบว่าระบบสามารถรองรับพรมในลักษณะลายเล็กและลายใหญ่ได้หรือไม่และ

ผลเป็นอย่างไร โดยลายใหญ่หมายถึงลายพรหมที่เป็นรูปกราฟฟิกที่ไม่มีจุดเล็กๆ ที่มีรายละเอียดน้อยๆ ในจุดนั้นๆ และลายเล็กหมายถึงลวดลายที่มีรายละเอียดเล็กๆ อยู่เป็นจำนวนมากเช่นพรหมที่เป็นลายดอกไม้เล็กๆ ตามขอบพรหม

8.2 การทดสอบการตัดแต่งระดับความสูงของเส้นใย

8.3 การทดสอบว่าสามารถแสดงสีได้จากการผสม 3 สีหลักได้หรือไม่อย่างไร

8.4 การทดสอบว่าระบบรองรับจำนวนเส้นใยได้สูงสุดเท่าไรและให้ผลเป็นอย่างไร

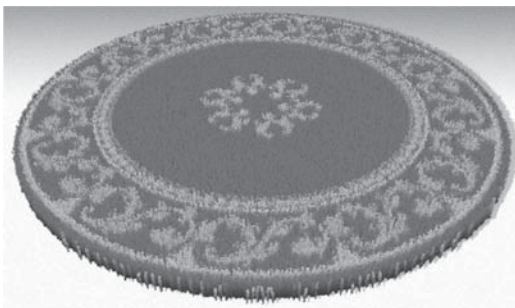
8.5 การทดสอบระยะเวลาในการสร้างภาพ

8.6 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นใยกับขนาดลูมิสไลซ์ ที่มีผลต่อภาพพรหมจำลอง

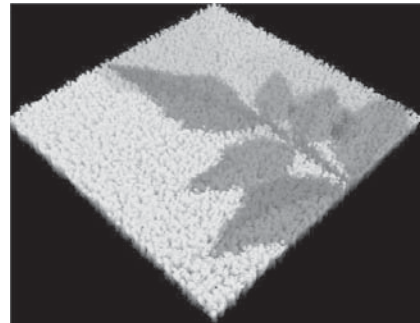
ในการทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ PC โดยมีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) Intel Celeron D 2.4 GHz Ram 512 VGA onboard S3 Prosavage DDR โดย Share Video Memory กับ Ram และผู้วิจัยเป็นผู้ทดสอบระบบ

ผลการวิจัย

1. ผลการทดสอบพรหมลายเล็กและลายใหญ่ ปรากฏว่าระบบสามารถจำลองพรหมได้ทั้ง 2 ชนิดตามที่แสดงในรูปที่ 12 และ 13 แต่ในกรณีพรหมลายเล็กนั้นจำเป็นต้องใช้ความหนาแน่นของเส้นใยมากกว่าพรหมลายใหญ่เพื่อให้ได้ผลที่ดี

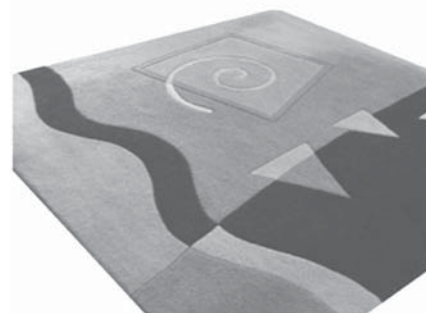
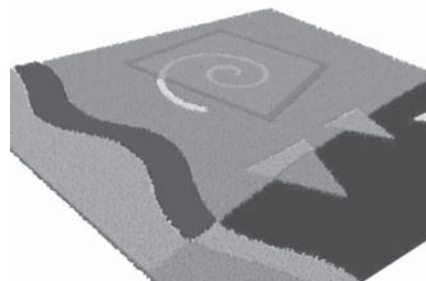


รูปที่ 12 แสดงพรหมในแบบลายเล็ก



รูปที่ 13 แสดงพรหมโดยในแบบลายใหญ่

2. ผลการทดสอบการตัดแต่งระดับความสูงของเส้นใยปรากฏว่าระบบสามารถทำการตัดแต่งระดับความสูงได้ตามข้อมูลระดับความสูงต้นแบบดังรูปที่ 14 ข้างล่าง โดยจะสามารถสังเกตเห็นในภาพจำลองว่ามีร่องระหว่างลาย หรือสีบริเวณขอบลายพรหมที่แตกต่างจากตรงบริเวณที่ไม่มีการตัดระดับ



รูปที่ 14 แสดงผลการเปรียบเทียบภาพจำลองและภาพจริง (บน) ภาพจำลองพรหมเมื่อมีการตัดแต่งระดับความสูง (ล่าง) ภาพถ่ายพรหมจริง

3. ผลการทดสอบการให้สี การทดสอบใช้ภาพถ่ายเป็นภาพทดสอบและผลคือระบบสามารถแสดงภาพได้ตามภาพต้นแบบ โดยในการออกแบบนั้นออกแบบให้สีของพรมเกิดจากการผสมสี 256 ระดับในทั้ง 3 สีซึ่งภาพที่ได้ตามทฤษฎีคือ 16.7 ล้านสี

4. ผลการทดสอบการรองรับจำนวนเส้นใยสูงสุดจากการทดลองตามตารางที่ 1 พบว่าระบบสามารถจำลองภาพไปได้ถึงระดับความหนาแน่นสูงสุด 400*400 เส้นและเมื่อความหนาแน่นสูงถึง 800*800 เส้น พบว่าระบบทำงานช้าลงอย่างมาก อย่างไรก็ตามได้ถูกออกแบบไว้รองรับการทำงานถึง 1000*1000 เส้นแต่ในผลการทดลองครั้งนี้พบว่าสามารถทำงานได้ในความหนาแน่นเส้นใย 800*800 เส้นใยในเครื่องทดสอบ

5. ผลการทดสอบระยะเวลาในการทำงาน พบว่าในการจำลองภาพพรมตั้งแต่ขนาดความหนาแน่น 50 เส้นจนถึง 400 เส้น โดยจะทำการเก็บเวลา ก่อนการทำการจำลองและเมื่อภาพถูกวาดจนสมบูรณ์ก็จะทำการบันทึกเวลาอีกครั้งหนึ่ง ผลการทดลองแสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่าระบบจะใช้เวลามากขึ้นหลายเท่าตัวเมื่อมีการเพิ่มความหนาแน่นในแต่ละด้าน ตัวอย่างเช่นเมื่อเพิ่มความหนาแน่น ต่อด้านจาก 100 เส้นเป็น 400 เส้น จะทำให้ใช้เวลาเพิ่มขึ้นเป็น 9.26 เท่า

6. ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของเส้นใยกับขนาดลูนีสไลซ์ ที่มีผลต่อภาพพรมจำลอง โดยทำการทดลองปรับค่าทั้งสองจำนวน 4 ครั้ง ตามตารางที่ 2 ซึ่งได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 15

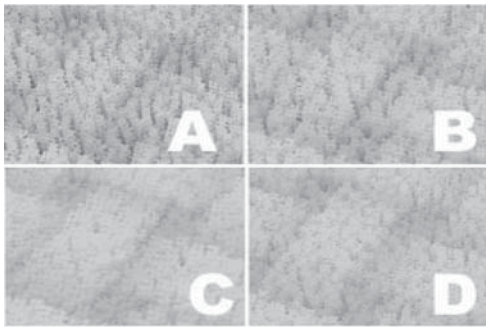
ตารางที่ 1 ความเร็วในการทำงานของระบบการจำลองภาพ

ความหนาแน่น		เวลาในการสร้างภาพ (วินาที)
ต่อต้าน	ทั้งหมด	
<50	<2500	0.65
50	2500	0.65
80	6400	1.2
100	10000	1.63
150	22500	3.45
200	40000	5.03
300	90000	8.78
400	160000	15.11
800	640000	59.48

ตารางที่ 2 ค่าความหนาแน่นและขนาดลูนีสไลซ์ที่ใช้ในการทดลอง

รูป	ความหนาแน่น	ขนาดลูนีสไลซ์
A	200	0.025
B	200	0.300
C	200	0.400
D	280	0.025

จะเห็นได้ว่าเมื่อจำนวนความหนาแน่นสูงขึ้นจะทำให้พรมดูสมจริงและสวยงามมากขึ้น และค่าขนาดลูนีสไลซ์ ควรมีขนาดเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมจึงจะได้ภาพที่สมจริงด้วยดังเช่นภาพในรูปที่ 15(D) ในขณะที่รูปที่ 15(B) และรูปที่ 15(C) มีการปรับขนาดลูนีสไลซ์ ให้ใหญ่ขึ้นเพื่อลดช่องว่างระหว่างเส้นใยนั้นจะทำให้ภาพพรมดูบวมผิดปกติ



รูปที่ 15 แสดงการจำลองภาพที่รายละเอียดต่าง ๆ กัน โดยที่พรมชั้นนี้จะมีค่าต่าง ๆ ในการปรับ

บทวิจารณ์

ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบจำลองภาพพรม ระบบจำลองภาพพรมสามารถทำงานได้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่ว ๆ ไป เนื่องจากใส่คำสั่งมาตรฐาน OpenGL และใช้รูปแบบภาพบิตแมปบนวินโดวส์ซึ่งเป็นรูปแบบภาพมาตรฐาน ระดับความเร็วในการสร้างโมเดลและสร้างภาพนั้นแปรผันตามความเร็ว CPU และการ์ดจอ เหตุผลหลักที่ทำให้การสร้างภาพไม่สามารถทำงานได้ในระดับเวลาจริงแม้ว่าจะพยายามลดขั้นตอนการทำงานในเส้นใยแล้วก็ตาม เป็นเพราะว่ามีการวาด Polygon จำนวนมากและมีการผสมสีของลูมิสไลซ์ ในแต่ละชั้นของลูมิสไลซ์ ในทุก ๆ ปมโหนดที่วาด

ในการจะเพิ่มคุณภาพของภาพ ให้สมจริงมากขึ้นนั้นจะประกอบด้วยองค์ประกอบหลาย ๆ ส่วนด้วยกัน ในงานชิ้นนี้เน้นการสร้างโครงสร้างความคมและรูปแบบของการสร้างภาพตัดขวางซึ่งเป็นตัวแทนของไหมพรมนับเป็นปัจจัยสำคัญอันดับแรกในการที่จะทำให้ภาพออกมาดูสมจริง เรื่องของการคำนวณแสง การจำลองอนุภาคในลักษณะอื่น ๆ ที่จะเพิ่มคุณภาพของภาพได้ รวมไปถึงขั้นตอนการสร้างภาพระดับความสูง และไดนามิกส์ของระบบ

สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เราได้พยายามที่จะสร้างโมเดลสำหรับการสร้างภาพพรมในลักษณะสามมิติเพื่อให้สามารถเห็นตัวอย่างของพรมก่อนมีการผลิตจริง โมเดลได้ถูกออกแบบมาเพื่อทำงานกับภาพในลักษณะของพรม ในโครงสร้างของการทำจึงมองในเรื่องของรูปแบบการนำข้อมูลที่มีอยู่เช่น ภาพลวดลาย ความหนาแน่นของไหมพรม สีพรม มาใช้งานซึ่งเป็นการนำเทคนิค Displacement, Particle System และลูมิสไลซ์ เป็นแนวคิดในการสร้างแบบจำลองนี้โดยตัวควบคุม ลักษณะส่วนใหญ่ก็พยายามจำลองให้มีความใกล้เคียงกระบวนการผลิตชิ้นงานจริง และในส่วนการจำลองนั้นมุ่งเน้นในเรื่องของอิสระในการปรับแต่ง และการนำเอาเทคโนโลยีกราฟฟิกในปัจจุบันมาใช้งานในงานทางอุตสาหกรรม โมเดลต้นแบบระบบการจำลองภาพพรมนั้นสามารถทำงานได้ในระดับหนึ่ง หากจะมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง ๆ ยังต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในอีกหลาย ๆ ขั้นตอน เพื่อให้เกิดความสมบูรณ์ของภาพมากขึ้น อย่างไรก็ตามก็ตีรูปแบบการจำลองภาพในลักษณะนี้สามารถจำลองภาพเส้นใยสั้น ๆ ได้ดีพอสมควร และการสร้างโครงสร้างควบคุมเส้นใยนั้นจะทำให้สามารถนำไปพัฒนางานในส่วนของการทำโมเดลในรูปแบบไดนามิกส์และสามารถทำอนิเมชันต่อไปได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้กับงานในลักษณะที่เป็นการจำลองภาพเส้นใยในลักษณะอื่น ๆ ได้อีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

สำหรับหัวข้อที่สามารถนำไปพัฒนาต่อได้นั้นมีอยู่หลายส่วนด้วยกัน ในส่วนของการสร้างลูมิสไลซ์ให้มีรูปแบบเปลี่ยนแปลงไปตามแสงที่ส่องเข้ามาซึ่งจะมีผลต่อการมองเห็นรูปแบบการ สร้างอนุภาคให้เป็นตามลวดลายของพรม ซึ่งอาจจะให้ผลการจำลองภาพที่สมจริงมากขึ้น การทำในส่วนที่เป็นไดนามิกส์ของโครงสร้างเส้นใยซึ่งจะใช้ในการทำภาพเคลื่อนไหว การทำระบบช่วยสร้างขอบของลายที่มี

การตัดให้เกิดเป็นร่องให้มีความสมจริงและตรงกับ
การใช้งานมากขึ้น การปรับระดับความเร็วโดยมุ่งเน้น
เรื่องของระดับของรายละเอียด

เอกสารอ้างอิง

- Anjyo, Ken-Ichi, Yoshiaki Usami and Tsuneya Kurihara. 1992. A Simple Method for Extracting the Natural Beauty of Hair. Computer Graphics (SIGGRAPH 92 Conference Proceedings). volume 26: 111-120.
- Bezier, P. 1974. Mathematical and Practical Possibilities of UNISURF. Academic Press, New York.
- Dan B Goldman. 1996. Fake Fur Rendering. Source International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques archive Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques table of contents: 127-134.
- Donald H. and M. Pauline B. 1996. Computer Graphic Second Edition. Prentice Hall international, inc.
- Foley, V. Dam, Feiner, Hughes. 1990. Computer Graphics Principle and Practice, Second Edition, Addison-Wesley.
- Gary S. 2004. Real-time Rendering of Fur. Honors Thesis, University of Sheffield.
- Lengyel, J. Praun, E. Finkelstein, A Hoppe, H. 2001. Real Time Fur over Arbitrary Surfaces. Source Symposium on Interactive 3D Graphics archive Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics table of contents: 227-232.
- Michael A. Kowalski Lee Markosian, J.D. Northrup, Lubomir Bourdev, Ronen Barzel, Loring S. Holden, John F. Hughes. 1999. Art-Based Rendering of Fur, Grass, and Trees. Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 433 - 438 .
- Miller, Gavin S.P. 1988. From Wire-Frame to Furry Animals. Graphics Interface' 88 Proceedings:138-145.
- Tae-Yong Kim Ulrich Neumann. 2000. A Thin Shell Volume for Modeling Human Hair. Computer Animation 2000(CA'00): 104-2000.
- Reeves, W. T. 1983. Particle Systems - A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects. Computer Graphics, 17(3) pp 359-376.
- Rosenblum, Robert E, Wayne E, Carlson, and Edwin Tripp. 1991. Simulating the Structure and Dynamics of Human Hair: Modeling, Rendering, and Animation", The Journal of Visualization and Computer Animation, 2: 141-148.
- Yanyun Chen, Stephen Lin, Hua Zhong, Ying-Qing Xu, Baining Guo, and Heung-Yeung Shum. 2003. Realistic Rendering and Animation of Knitwear: IEEE Visualization and Computer Graphics. 9(1): 359-368.